

J-PARC 加速器の現状 STATUS OF J-PARC ACCELERATORS

長谷川 和男^{#, A)}、金正 倫計^{A)}、小栗 英知^{A)}、山本 風海^{A)}、林 直樹^{A)}、山崎 良雄^{A)}、
 内藤 富士雄^{B)}、吉井 正人^{B)}、外山 毅^{B)}、山本 昇^{B)}、小関 忠^{B)}

Kazuo Hasegawa^{#, A)}, Michikazu Kinsho^{A)}, Hidetomo Oguri^{A)}, Kazami Yamamoto^{A)}, Naoki Hayashi^{A)},
 Yoshio Yamazaki^{A)}, Fujio Naito^{B)}, Masahito Yoshii^{B)}, Takeshi Toyama^{B)}, Noboru Yamamoto^{B)} and Tadashi Koseki^{B)}

^{A)} J-PARC Center, JAEA, ^{B)} J-PARC Center, KEK

Abstract

After the summer shutdown in 2018, the J-PARC restarted user operation in late October. While beam power to the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) was 500 kW as before the summer shutdown, linac beam current was increased from 40 to 50 mA. Operation of the Main Ring (MR) was suspended due to the modification and/or maintenance of the Superkamiokande (neutrino detector) and Hadron experimental facility. The user operation was resumed in the middle of February for the Hadron experimental facility at 51 kW. But on March 18, one of the bending magnets in the beam transport line to the MR had a failure. It was temporarily recovered and restored beam operation on April 5, but the failure occurred again on April 24 and the beam operation of the MR was suspended. In the fiscal year of 2018, the availabilities for the MLF, neutrino and hadron facilities are 94%, 86%, and 74%, respectively.

1. はじめに

J-PARC 施設は、リニアック、RCS (Rapid Cycling Synchrotron)、MR (Main Ring synchrotron)、RCS からの 3 GeV ビームを利用する物質生命科学実験施設 (MLF)、MR からの 30 GeV ビームを利用するハドロン実験施設 (HD) およびニュートリノ実験施設 (NU) から構成される。

2018 年夏季シャットダウン後、加速器の立ち上げや調整を経て、10 月下旬に MLF の利用運転を再開した。MR は、NU からのニュートリノビームを測定するスーパーカミオカンデの改造や、HD の保守や整備で、運転再開は 2019 年に入ってからになった。前回の年会では、2018 年夏季シャットダウンまでの状況を報告[1]しており、ここでは、その後の進展や状況について報告する。

2. 運転状況

利用運転開始時からの MLF と MR のビーム出力の履歴を Fig. 1、および Fig. 2 に示す。MLF では出力の累計も示しており、運転開始から約 8,000 MWh となる。MLF では、利用運転の出力を着実に向上し、2015 年 1 月には 1 MW 相当 (シングルショット) の加速を達成した。しかし 2015 年の 4 月と 11 月の 2 回、500 kW の利用運転時に中性子生成標的容器の不具合により停止し、その後、スペアの標的に交換し、200~150 kW で利用運転を行ってきた。2017 年夏に、新しい設計で製作した標的に交換し、11 月には 300 kW、1 月から 400 kW、そして 4 月下旬から 500 kW へ徐々に出力を上げ、2018 年 7 月に 1 MW で 1 時間の運転に成功した。2018 年夏にも標的を交換し、500 kW での利用運転を行った。詳細は 2.3 に示すが、この入射器としてのリニアックと RCS は非常に安定に運転できた。さらに、夏季メンテナンス直前の 2019 年 7 月、1 MW の 10.5 時間の連続運転を行い、1 MW での運転経験を着実に積んだ。MR でのビームパワーは、

NU 向けの速い繰返し (Fast Extraction: FX) では、490~500 kW (2.6×10^{14} ppp) で、また、HD 向けの遅い繰返し (Slow Extraction: SX) では、50~51 kW (5.5×10^{13} ppp) で利用運転を行った。

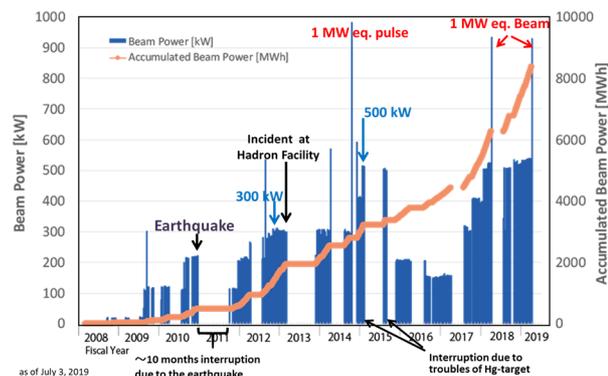


Figure 1: History of beam power and accumulated power for the MLF (by courtesy of the MLF).

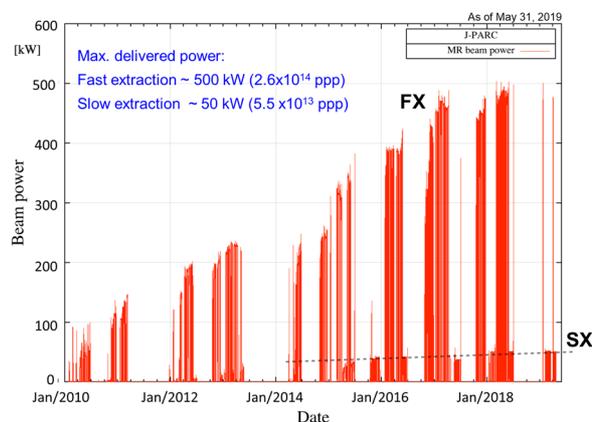


Figure 2: Beam power history for the Main Ring.

[#] hasegawa.kazuo@jaea.go.jp

2.1 2018 年夏期停止期間での主な作業

リニアック

リニアックでは、2011 年の震災以降、何台かの SDTL 空洞で不安定な状態（定格の高周波電力付近で反射が大きくなる）となり、2015 年に内部の拭き取り洗浄を行い良好な結果を得た[2]。2017 年もこの作業を 3 台に適用して改善し、安定となったため 2018 年には実施しなかった。しかし、徐々に不安定な領域が大きくなる空洞があり、運転に支障が出る前に 2019 年夏に 1 台実施する予定である。洗浄は手が届く範囲に限られ、拭き取れなかった部分の不純物が徐々に拡散してくるものと推定している。

リニアックによる計画外の停止は、冷却水の流量低下への対応や、クライストロン高圧電源回りの改善などの効果により、停止時間としては減少してきた。しかし停止回数については、ロスモニターや RFQ による発報がそれぞれ 1 日に 10 回以上あり、改善の余地が残っていた。

ロスモニターについては、実際にビームロスによる発報かどうかの確認を慎重に行った。放射化を起こすようなロスの場合にはビームを止めないといけないが、ほとんどの場合は、1 台のロスモニターのみで、数百 ns の短い時間での過大な信号で発報していることが分かった。そこで、なるべく 1 台では発報の信号を出さず、大きなビームロス時には信号を出すように、使っている比例計数管の高圧電圧やインピーダンス抵抗による時定数の見直しを行った結果、回数が数分の 1 に減少した。また、これによる放射化の増加は認められていない。

RFQ については、1 号機が真空度の改善でトリップ回数が減ってきた経験があり、現在使っている 3 号機でも対応した。主ポンプであるクライオポンプの排気量に対して、チューナーを兼ねた引き口のコンダクタンスが小さく、そこが排気能力の律速となっていた。そこで、それまでポンプ 1 台に引き口 1 個であったのを、Fig. 3 に示すように、引き口 3 個を束ねるマニホールドを設置してポンプの排気量をより有効に使えるように改善し、RFQ 内の真空ゲージ位置での真空度は 8 割ほどになった。これまでのところ、大幅なトリップ頻度の改善は見られていないが、長期間の運転での推移を見てゆきたい。

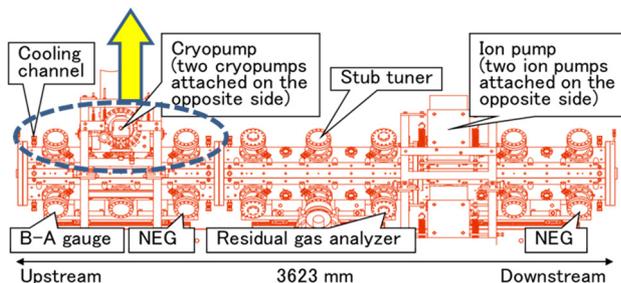


Figure 3: Schematic view of the vacuum system for the RFQ.

RCS

RCS でも通常の保守作業に加え、2016 年 4 月に発生したコリメータの真空リークへの対応を行った。2016 年夏に第 1 段階として、固定式吸収体と遮蔽体から構成されるコリメータに交換した。最終的な RCS の大出力化には、故障したものと同様に、可動式吸収体と遮蔽体からなるコリメータが必要である。2017 年夏に入れ替えを予定していたが、駆動コリメータ本体と真空容器間の高周波コンタクトが破損していることが判明し、2018 年に延期し据付け、正常な状態に復帰した。Figure 4 は据付直後のコリメータの写真である。



Figure 4: A new collimator with movable blocks.

また、今後の保守性の改善や信頼性の向上のための作業をいくつか実施した。その一つは、RCS の入射部のセラミックスダクトの交換である。空間的な制約からセラミックスダクト同士を直接締結している部分があったが、ベローズ付きに変更し、応力の低減や保守性の向上を図った。また、入射部や出射部の真空度の向上のためのポンプの増設も行った。

メインリング (MR)

MR では、計画外停止での稼働率低下の要因の一つに、冷却水流量の低下がある。その原因に、磁石で使っているホローコンダクターの流路が狭くなり流れにくくなっていることがある。その詰まりを改善するために、圧空と水で内部の洗浄作業を行った。Figure 5 に SX セプタム磁石で行っている例を示す。その結果、Fig. 6 に示すように納入時までは復帰しないものの、洗浄の効果が見られ、流量の回復が図られた。その良好な結果を受け、他の流量低下が観測されている磁石についても適用した。

2.2 2018 年秋から 2019 年 3 月までの運転経過

夏期停止後、10 月下旬からの MLF の利用運転に向け上流部からビーム調整を開始した。リニアックは 10 月 7 日、RCS は 10 月 14 日からビーム調整を開始した。MR は、スーパーカミオカンデのニュートリノ検出器の改造、ハドロン実験施設では保守や整備があり、どちらの施設もビームの受け入れができないことから運転を休止した。その間、保守とともに、性能向上に向けた新電源の据え付けや調整を進めた。

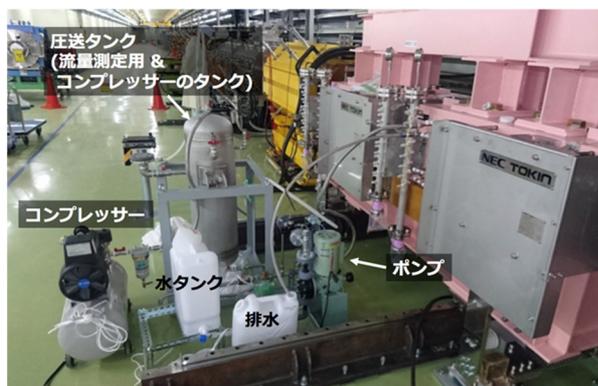


Figure 5: Cleaning system for inside of hollow conductors. This shows an example to the Slow Extraction (SX) septum magnet SM3.

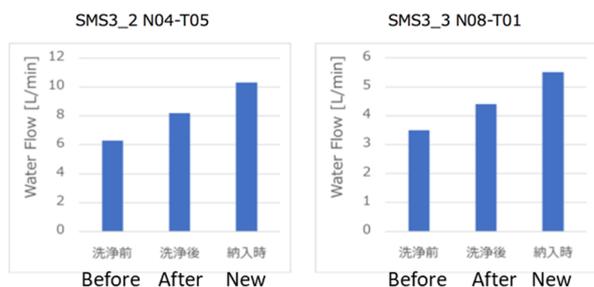


Figure 6: Cooling water flow before and after the cleaning process, and brand new condition for two hollow conductor cooling channels in the SM3 magnet.

MLFは、新しい標的に交換が終了し、10月21日から調整運転を開始した。まずは、夏前の出力500kWより抑えて300kWにして標的の状況を確認し、11月6日に500kWに上げた。基本的には、それ以降、2019年7月頭の利用運転終了まで500kWで運転した。

MLFの出力は500kWで変わらないものの、2018年10月からの加速器運転のハイライトは、それまで利用運転ではリニアックのピーク電流を40mAで行っていたものを、定格となる50mAに上げたことである。500kWは定格の半分であるので、中間パルスやマクロパルスのデューティで調整して出力は抑えているが、ビームダイナミクスや機器の動作的には定格の条件で運転していることになる。この条件での運転の経験は、更なる安定運転への展開への有用なデータとなる。今後、1MWへの出力増加は、デューティを定格まで上げてゆくことで対応することになる。

年内のMLFの利用運転は12月16日朝までで、その後加速器スタディを12月21日の朝まで行い、年末の停止に入った。例年はクリスマス前後まで運転する機会が多いが、運転を早めに終えたのは、J-PARCが設置されているサイトである原子力機構・原子力科学研究所の特高変電所の機器の老朽化の対応のため、全所停電が12月22日~24日まで行われたためである。

年末年始の後、通常は1月第一週に加速器の立ち上げを開始するが、2019年は、MLFでの使用済標的容器を一時保管するための建家に輸送する必要があり、そのためにビームを受け入れられない期間が発生し遅めの立ち上げとなった。リニアックは1月18日にビーム調整を開始し、23日からMLFの利用運転を500kWで開始し、3月末まで長い停止もなく利用運転を行った。

一方、MRのビーム調整は1月22日から24日の3日間だけ、速い取り出し(FX)モードでスタディを行った。その後一旦休止し、2月8日にSXの調整を開始、11日からハドロン実験施設の利用運転を、出力50~51kWで開始した。予定では3月25日の朝までであったが、3月18日、RCSからMRまでのビーム輸送系(3-50BTと呼ぶ)に設置している偏向電磁石の1台(Fig. 7, B15Dと呼ぶ)の下側コイルに層間の絶縁不良が発生し、運転を停止した。絶縁不良と見られる下コイルの最下段をバイパスし4月4日からビーム調整、5日からハドロンの利用運転を再開したが、絶縁不良はバイパスした以外でも進行しており、4月24日にビーム運転を停止し、夏に予定していた保守を前倒しすることにした[3-5]。

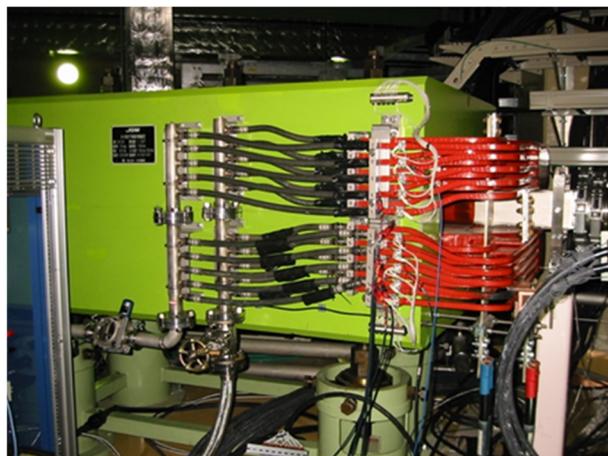


Figure 7: Bending magnet (B15D) in the beam transport line from the RCS to the MR.

2.3 2018年度の運転時間、稼働率、停止要因

2018年度(2018年4月1日から2019年3月31日まで)の運転統計をTable 1及びFig. 8に示す。総運転時間5,824時間(加速器の立ち上げや調整等も含む)。Figure 8の各円グラフの総合計時間に当たる)中のユーザへの供給時間は、MLFは4,129時間で施設の利用時間に対する稼働率94%、NUは1,053時間で86%、HDは1,089時間で74%であった。

Table 1: Operation Time Summary in JFY2018

Facility	User time (hours)	Trouble, Acc. only (hours)	Trouble, Fac. only (hours)	Net time, (hours)	Availability, Total (%)
MLF	4,388	252 (5.7%)	6 (0.1%)	4,129	94.1
Neutrino (FX)	1,224	149 (12.2%)	22 (1.8%)	1,053	86.0
Hadron (SX)	1,477	366 (24.8%)	22 (1.5%)	1,089	73.7

機器ごとのダウンタイムを Fig. 9 に示す。リニアックは冷却水の流量低下への対応やクライストロン電源の放電対策などを取ったことで安定になった。さらなる流量の安定化を目指し、その原因の一つと考えられる銅粉発生の調査を進めている[6]。リニアックでは HVDC に分類される高圧電源での停止が長かった。これには 324 MHz クライストロンの故障で 20 時間ほどの停止を含んでいるが、これは夏季停止後のリニアック調整時に発生したもので、幸いにも利用運転の稼働率を下げるものではなかった。しかし 324 MHz のクライストロン 20 本中、運転開始時から使っていて、使用時間が当初の推定を超える 7 万時間弱のものが 8 本あり、稼働率低下への懸念もあることから、その対応も進めている[7]。

RCS は前年度と同様、全体的に安定であったが、2018 年度はキッカケーブルの絶縁不良やバンプ電磁石電源による停止が主なものであった。

MR ではいくつかの停止要因があった。Q 磁石 (QM) は冷却水の流量低下 (対策は前述)、偏向磁石 (BM) はタイミング信号系の不具合、高周波 (RF) は真空管の不具合、速い取り出し (Fast-Ext) は屋外トランスからの油漏れなど、多くの機器が関わっている。前述の B15D の故障は、機器としては偏向磁石ではあるが、設置場所がビーム輸送系であり、主電磁石の偏向磁石の不具合と区別するため "Others" に分類し、342 時間の中のほとんどを占めている。

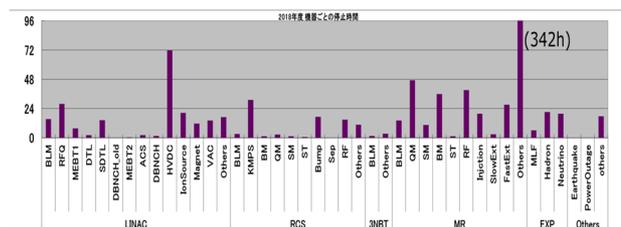


Figure 9: Downtime statistics in hours by components in JFY 2018.

2.4 2019 年度 (2019 年 4 月～7 月頭) の運転状況

2018 年度末に近い 3 月 26 日のメンテナンス日を境に Run 番号を #81 から #82 に更新し、イオン源の交換、リニアックの調整を行っている間、B15D の調査を行った。これは、当該磁石が RCS のエリア内にあり、RCS の運転中は立ち入りができないためである。このため MLF の年度内利用運転の終了を待ってからの作業となり、年度末に予定していた RCS のスタディを短縮しての対応となった。

MLF は 4 月 2 日から利用運転を再開し、MR は 4 日からの調整と 5 日からの HD 利用を開始したが、それ以降の経過は 2.2 で述べた通りである。MLF の出力は 500 kW で一定で、長時間停止するような故障やトラブルはなく、予定していた 7 月 3 日朝まで、4 月からの評価では 96% の高い稼働率で利用運転を終了した。RCS 内での残留放射線量は作業に支障をきたすレベルではないが、入射部のフォイルの散乱によるロス低減が、今後出力を上げる際の課題となる[8]。

その後、MLF の 1 MW の 10.5 時間の連続試験に成功した。この間の MPS での停止はわずか 3 回で、非常に安定な運転を実証できた。その後、リニアックと RCS のスタディを行い、7 月 8 日に夏季メンテナンスに入った。

3. まとめ

2018 年度後半と 2019 年度 7 月までの運転では、MLF 向けは、500 kW と出力は一定であるが、稼働率は 94～96% と高く、リニアック、RCS、中性子標的が安定に運転できることを示している。また、J-PARC で製作した RCS 入射用の荷電変換フォイルを利用運転で使用し、その評価も進んでいる[9]。

また、1 MW の条件で、去年は 1 時間であったが今年は 10.5 時間の連続運転に成功し、長時間運転時の温度や冷却能力の課題なども示された。これらの結果を、より安定な利用運転につなげてゆく予定である。

リニアックのピーク電流を、2018 年 10 月から、それまでの 40 mA から定格の 50 mA に上げて利用運転を開始した。これに伴いイオン源からの引き出し電流も上がるとともに、この条件での連続 3 か月の利用運転の経験を積み上げている[10]。

MLF の利用運転を着実に進める一方で、今後、強度を上げる支障となるビームロスの低減や、更なる大強度化に向けた試験も進めている[11,12]。イオン源も、大強度化 (リニアックの出口で 60 mA) に向けた 72 mA の引き出しに対応している[10]。

MR では B15D の不具合で 4 月に運転を休止せざるを得なくなった。絶縁不良を起こしたコイルは夏のメンテ

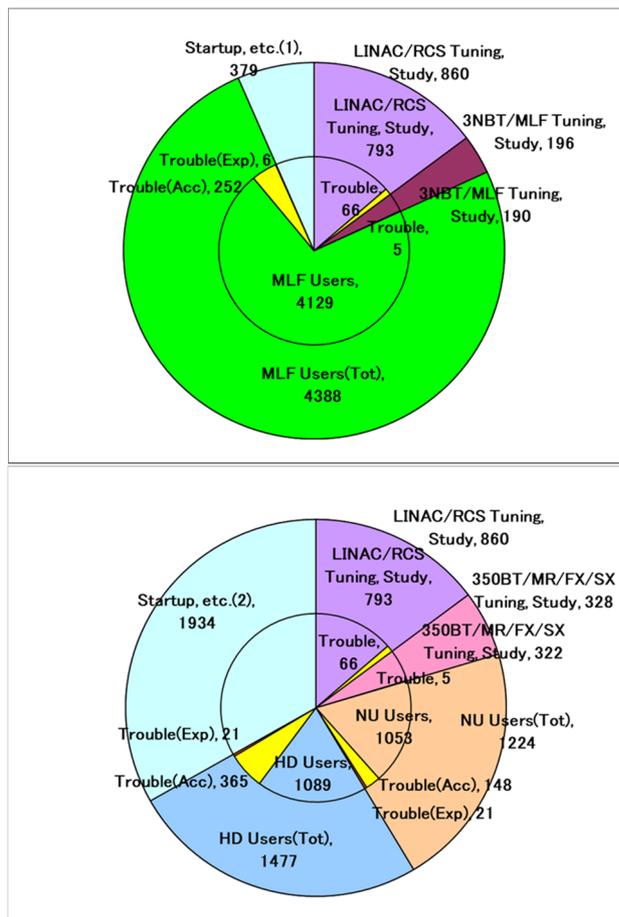


Figure 8: Operation statistics for the MLF (top) and for the MR (bottom) users in JFY 2018.

ナンス期間に鉄芯から取り出した。今後、詳細な調査を行う[13]とともに、現在、予備のコイルを作っており、交換して秋からの運転再開を目指す。

J-PARC 加速器は、利用運転を開始してから 10 年近く経過し、クライストロンなどの消耗品、タイミングや制御系、冷却水設備や電源などで更新時期に近づいてきており、これらの故障での停止も目立ってきた。また、屋外のトランスやコンデンサは、太平洋に近く塩害による腐食も進んでおり、RCS や MR では大きな課題となっている。

MR では、繰り返しを速くして大強度化を目指すための対応として、コンデンサを用いたエネルギー貯蔵型の主電磁石電源の調整[14]、高磁場や低磁場セブタムの試験[15,16]を行っている。

こうした夏季のメンテナンスや性能向上の作業の後、各機器を立ち上げ、11 月上旬からの利用運転再開に備える予定である。

謝辞

本報告は、各加速器施設の責任者や加速器セクションリーダーが代表として行っているが、J-PARC 加速器の運転や性能向上は、当然、多くの方々に支えられており、ここに感謝を申し上げる次第である。

参考文献

- [1] K. Hasegawa *et al.*, “Status of J-PARC Accelerators”, PASJ2018, pp. 1317-1321, FSP014, 2018.
- [2] T. Ito *et al.*, “Multipactor Problem of J-PARC SDDL”, Proc. of IPAC2017, pp.4184-4186, Copenhagen, Denmark, THPIK039, 2017.
- [3] M. Shirakata *et al.*, “Layer Short on B15D Magnet in J-PARC 3-50BT Line”, in these proceedings, THOH06.
- [4] J. Takano and M. Shirakata, “Process and Guess of the Layer Short in B15D Magnet of J-PARC 3-50BT Line”, in these proceedings, WEPH037.
- [5] M. Tomizawa *et al.*, “Beam Orbit Study for a Temporary Recovery of the J-PARC 3-50BT Magnet”, in these proceedings, WEPI044.
- [6] K. Sukanuma *et al.*, “Investigation for Tiny Metal Contamination of Water Cooling System in J-PARC Linac”, in these proceedings, THPI042.
- [7] Y. Fuwa *et al.*, “Performance Test of J-PARC 324 MHz Klystrons”, in these proceedings, THPH010.
- [8] K. Yamamoto, “History of the Residual Dose Distribution and Worker Doses in J-PARC 3GeV Rapid Cycling Synchrotron”, in these proceedings, WEPH021.
- [9] T. Nakanoya *et al.*, “Fabrication Status of Charge Stripper Foil for 3GeV Synchrotron of J-PARC”, in these proceedings, WEPI036.
- [10] K. Ohkoshi *et al.*, “Operation Status of the J-PARC H- Ion Source”, in these proceedings, WEPI038.
- [11] Y. Liu *et al.*, “Beam Loss Mitigation and Commissioning Progress at J-PARC, Linac, in these proceedings, FRPI049.
- [12] H. Hotchi *et al.*, “Recent Progress of the J-PARC RCS Beam Commissioning and Operation: Efforts to Realize a Higher Beam Power beyond 1 MW”, in these proceedings, WEPI043.
- [13] T. Shibata *et al.*, “The Study of Investigation of the Shorted Coil of Magnet”, in these proceedings, WEPH029.
- [14] T. Shimogawa *et al.*, “New Power Supply of Main Magnets for J-PARC Main Ring Upgrade”, Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia, TUPMP016, pp. 1266-1268, 2019.

[15] T. Shibata *et al.*, “The New High-Field Septum Magnet for Upgrading of Fast Extraction in MR J-PARC”, in these proceedings, THOH05.

[16] T. Shibata *et al.*, “The New Low-Field Septum Magnet for Upgrading of Fast Extraction in MR J-PARC”, in these proceedings, WEPH028.